

Е.Н. ФЕДОСЕЕНКО

**ПОПРАВКА НА КОНЕЧНЫЕ РАЗМЕРЫ ОБЪЕМА ЗЕМЛИ
ПРИ РЕШЕНИИ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ
ЛАПЛАСА С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ИДЕАЛЬНЫХ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ
ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ**

Отримано кількісні значення поправок на кінцеві розміри об'єму землі при рішенні крайової задачі для рівняння Лапласа методом кінцевих різниць з метою визначення електричних характеристик ідеальних зосереджених заземлювачів. Поправки на кінцеві розміри об'єму землі одержано для таких характеристик, як опір розтіканню й потенціали на поверхні землі.

Numerical values of corrections for finite size of ground volume for the boundary-value problem solution for Laplace's equation by the finite difference method with the object of calculation of electric descriptions of perfect concentrated groundings were got. The corrections for finite size of ground volume were got for such descriptions as resistance to spreading and potentials on a terrene.

Постановка проблемы. Расчет сопротивления заземляющего устройства (ЗУ) и напряжения прикосновения и шага требует решения задачи расчета электрического поля токов, выходящих из заземлителей в землю, что составляет значительную часть теории ЗУ [1]. Закономерности поля электрического тока и электростатического поля внешне схожи между собой [2] и позволяют на основании исследования электростатического поля определять электрические характеристики заземлителей. При этом дифференциальное уравнение электростатического поля (уравнение Лапласа $\nabla^2\varphi = 0$) имеет аналитическое решение лишь в отдельных случаях (при простой форме границ поля). Во многих практических случаях прибегают к приближенным расчетам, используя, например, методы численного интегрирования. Численное решение краевой задачи для уравнения Лапласа методом конечных разностей применительно к идеальному сосредоточенному заземлителю произвольной формы в бесконечном полупространстве земли требует искусственного ограничения рассчитываемой области поля [3]. Эта процедура требует количественной оценки для внесения соответствующих поправок.

Анализ литературы. В работе [4] предложено учитывать поправки на конечные размеры электролитической ванны, стенки которой не являются поверхностью нулевого потенциала, при физическом моделировании заземлителей сложной конструкции. Работы [5, 6] содержат предложения решать краевую задачу для уравнения Лапласа в цилиндрических координатах при расположении идеального сосредоточенного заземлителя – аналогов арматурного каркаса железобетонных подножников и стоек в ограниченном объеме.

ме земли. Такие расчетные модели арматурного каркаса в ограниченном объеме земли, обеспечивающие определение электрических характеристик с заданной точностью, подтверждены результатами физического моделирования и натурных испытаний, поэтому не предполагают учета поправки на конечные размеры объема земли. Вместе с тем, полученные в последнее время технические решения [7, 8] вертикального электрода заземления, расположенного в ограниченном объеме мелкодисперсного технического углерода, т.е. в земле подвергшейся обработке с целью уменьшения ее удельного сопротивления вблизи от заземлителя, для расчета изменения потенциала на поверхности земли и сопротивления заземлителя требует учета поправок на конечные размеры земли при решении упоминавшейся выше задачи.

Целью настоящей работы является получение количественных значений поправки на конечные размеры объема земли при определении электрических характеристик идеальных сосредоточенных заземлителей.

Основная часть. Опыт эксплуатации энергообъектов подтверждает наличие электромагнитных помех и их негативного влияния на работу устройств релейной защиты и автоматики на микропроцессорной и микроэлектронной базе. В числе способов снижения электромагнитной связи между источником влияния и цепями, подверженными влиянию, рекомендовано [8], в частности, снижение сопротивления растеканию тока с ЗУ энергообъекта за счет установки дополнительных вертикальных электродов заземления или выполнения выносного заземлителя. Заглубление каждого из вертикальных электродов заземления может выполняться путем размещения его в центре скважины диаметром на более 50 диаметров электрода, которую заполняют мелкодисперсным техническим углеродом [7]; на поверхности электрода в соответствии с [8] для снижения скорости коррозии может быть сформирована твердая токопроводящая пленка. Такое решение эффективно улучшает электрические характеристики ЗУ энергообъекта.

Выполним применительно к указанному выше способу заглубления вертикальных электродов анализ необходимости учета поправки на конечные значения объема земли при решении краевой задачи для уравнения Лапласа методом конечных разностей. Будем исходить из тех же положений, которые принимались в работах [5, 6] при искусственном ограничении рассчитываемой области поля: ограниченный объем земли цилиндрической формы с размерами в 4-5 раз превышающими размеры заземлителя. При практически осуществимом решении заглубления вертикального электрода в скважине, заполненной техническим углеродом, имеем, например, такие размеры последней: диаметр равен 0,5 м, глубина – 3,0 м; ограниченный объем земли цилиндрической формы принимаем – соответственно 5,0 м и 10,0 м (поверхности нулевого потенциала). Учитывая по [9], что удельное сопротивление мелкодисперсного технического углерода в сжатом состоянии составляет 0,02 Ом·м, т.е. заведомо на несколько порядков меньше удельного сопротивления

хорошо проводящего грунта (5,0 Ом·м), рассматриваем скважину с вертикальным электродом в ее центре как идеальный сосредоточенный заземлитель с размерами равными размерам скважины. Для указанных геометрических характеристик рассчитываемой области поля и определим соответствующие поправки, причем ограничимся только случаем однородной земли. Перенос результатов на двухслойную расчетную модель земли, допустим вследствие относительно достаточной удаленности поверхностей нулевого потенциала от идеального сосредоточенного заземлителя.

Для определения поправки на конечные размеры объема земли при расчете сопротивления растеканию идеального сосредоточенного заземлителя воспользуемся выражением для полуэллипсоида вращения [1]:

$$R = \frac{\rho_0}{4\pi l_0} \ln \left[\frac{\left(\sqrt{r_0^2 + l_0^2} + l_0 \right)}{\left(\sqrt{r_0^2 + l_0^2} - l_0 \right)} \right], \quad (1)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление однородной земли; r_0 – малая полуось и l_0 – полуфокусное расстояние полуэллипсоида вращения.

Заменив, как в [1], идеальный сосредоточенный заземлитель полуэллипсоидом с $r_0 = 0,5$ м и $l_0 = 3,0$ м, а ограниченный объем земли цилиндрической формы – полуэллипсоидом с $r_0 = 5,0$ м и $l_0 = 10,0$ м, имеем их сопротивления растеканию в полупространстве однородной земли с ρ_0 соответственно: $0,169\rho_0$ и $0,023\rho_0$. Стало быть сопротивление между полуэллипсоидами составит $0,146\rho_0$, а поправка при расчете сопротивления $\varepsilon_R = 0,169/0,146 = 1,158$.

Определение поправки на конечные размеры объема земли при расчете потенциалов произведем используя принцип наложения в процессе последовательного перераспределения потенциалов до достижения с принимаемой точностью заданных значений потенциалов на границах поля ($\varphi_{\text{элл,с,з}} = 100$ и $\varphi_{\text{элл,о,з}} = 0$, где индексы «элл,с,з» и «элл,о,з» означают эллипсоиды, моделирующие сосредоточенный заземлитель и ограниченный объем земли соответственно). В частности для семейства конфокальных полуэллипсоидов вращения распределение потенциалов подчинено выражению

$$\varphi_r = \varphi_{\text{элл,с,з}} \frac{\ln \left[\left(\sqrt{r_0^2 + l_0^2} + l_0 \right) / \left(\sqrt{r_0^2 + l_0^2} - l_0 \right) \right]}{\ln \left[\left(\sqrt{r^2 + l_0^2} + l_0 \right) / \left(\sqrt{r^2 + l_0^2} - l_0 \right) \right]}, \quad (r_0 = r_{\text{элл,с,з}}), \quad (2)$$

по которому определены φ_r при $r = 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5$ и $5,0$ м. Поскольку на границах поля $\varphi_{\text{элл,с,з}} = 100$ и $\varphi_{\text{элл,о,з}} = 0$, а при расчета по выражению (2) для $r = 5,0$ м потенциал получается отличным от нуля, то на первом шаге приближения

полуэллипсоиду с этой полуосью придается рассчитанное значение потенциала со знаком «минус». По выражению, аналогичному (2) уточняем значения потенциалов в контрольных точках поля и сосредоточенного заземлителя. Ограничившись тремя итерациями ($\varphi_{\text{элл,с,з}} = 99,653$ и $\varphi_{\text{элл,о,з}} = 0$) имеем значения поправок

$$\varepsilon_{\varphi,r} \Big|_{r=0,5} = 1,033; \quad \varepsilon_{\varphi,r} \Big|_{r=0,75} = 1,068; \quad \varepsilon_{\varphi,r} \Big|_{r=1,0} = 1,108; \quad \varepsilon_{\varphi,r} \Big|_{r=1,25} = 1,152;$$

$$\varepsilon_{\varphi,r} \Big|_{r=1,5} = 1,204. \text{ Используем среднее значение поправки при расчете потенциалов}$$

$$\varepsilon_{\varphi} = 1,113.$$

Выводы. Получены численные значения поправок на конечные размеры объема земли при решении краевой задачи для уравнения Лапласа с целью определения электрических характеристик идеальных сосредоточенных заземлителей с геометрическими характеристиками близкими к практически реализуемым решениям.

Перспективы дальнейших исследований в данном направлении – получение расчетной совокупности линейных электродов, замещающих вертикальный электрод заземления, расположенный в ограниченном объеме мелкодисперсного технического углерода.

Список литературы: 1. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с. 2. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 463 с. 3. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с. 4. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978. – 224 с. 5. Минченко А.А., Федосеенко Е.Н. Замещение естественных сосредоточенных заземлителей совокупностью электродов при расчетах электрических характеристик сложных заземляющих устройств электроустановок // Вісник НТУ “ХП”. Збірник наукових праць. Тем. випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ “ХП”. – 2006. – №7. – С. 121-124. 6. Минченко А.А., Федосеенко Е.Н. Учет естественной проводимости растеканию тока с арматуры железобетонных стоек при расчетах сложных заземляющих устройств электроустановок с помощью совокупности вертикальных электродов // Вісник НТУ “ХП”. Збірник наукових праць. Тем. випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ “ХП”. – 2006. – №28 – С. 97-100. 7. Федосеенко О.М., Кисельов Є.Т., Минченко А.А., Яровий В.М., Калінін Є.М. Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій // Патент України №9874. Бюл.№10. 2005. 8. Минченко А.А., Федосеенко О.М., Минченко Анд.А., Яровий В.М. Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій // Рішення про видачу декл. патенту на корисну модель №6555/1 від 07.03.2007. 9. Врублевский Л.Е., Зайцев Ю.В., Тихонов А.И. Силовые резисторы. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.

Поступила в редколлегию 18.05.07